

Optimisation Morpho-Energétique Des Villes En Climat Chaud : Simulation Et Analyse De L'îlot De Chaleur Urbain A Tana- Masoandro

[Morpho-Energetic Optimization Of Cities In Warm Climates: Simulation And Urban Heat Island Analysis In Tana- Masoandro]

¹RANAIVOSAMIMANANA Tolotra Stéphane, ²RALIJAONA Herilala Tafitasoloniaina,
³RAVONINJATOVO Achille, ⁴ANDRIANAIVO Lala

¹tolotrastephan@gmail.com

²UDI, tafitaralijaona@gmail.com

³ESPA, achillegc@yahoo.fr

⁴ESPA, andrianaivo.andri@gmail.com

Université d'Antananarivo

Laboratoire EXERGIE et GEOINGENIERIE

BP 1500, Antananarivo 101, Madagascar

Auteur correspondant : RANAIVOSAMIMANANA Tolotra Stéphane



Résumé : Cette étude explore l'effet de la morphologie urbaine et des matériaux de construction sur l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (ICU) dans le contexte tropical de la ville nouvelle de Tana-Masoandro. À partir de modèles empiriques (Oke, 1973–1987) et de simulations numériques tridimensionnelles, les résultats indiquent une intensité thermique variant entre 5,6 °C et 11,7 °C selon les configurations urbaines. Les bâtiments avec murs isolés offrent une stabilité thermique intérieure, mais peuvent engendrer une surconsommation énergétique si la ventilation n'est pas optimisée. La morphologie compacte, l'ombrage naturel et la ventilation influencent fortement les températures et les besoins en refroidissement. Les résultats soutiennent des stratégies bioclimatiques intégrant la forme urbaine, des matériaux adaptés et une ventilation naturelle pour améliorer le confort thermique et limiter les ICU en climat tropical.

Mots-clés : îlot de chaleur urbain, microclimat, morphologie urbaine, modélisation, Tana-Masoandro, performance énergétique, confort thermique, climat tropical

Abstract: This study explores the effect of urban morphology and building materials on the intensity of the urban heat island (UHI) in the tropical context of the new city of Tana-Masoandro. Based on empirical models (Oke, 1973–1987) and three-dimensional numerical simulations, the results indicate a thermal intensity ranging between 5.6 °C and 11.7 °C depending on urban configurations. Buildings with insulated walls offer interior thermal stability, but can lead to energy overconsumption if ventilation is not optimized. Compact morphology, natural shading, and ventilation strongly influence temperatures and cooling needs. The results support bioclimatic strategies integrating urban form, suitable materials, and natural ventilation to improve thermal comfort and limit UHIs in tropical climates.

Keywords: urban heat island, microclimate, urban morphology, modeling, Tana-Masoandro, energy performance, thermal comfort, tropical climate

I. Introduction

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) constitue un enjeu majeur pour les villes en expansion rapide, particulièrement dans les régions tropicales. Il se traduit par une élévation des températures dans les zones urbanisées par rapport à leurs périphéries rurales, affectant le confort thermique, la qualité de l'air et la consommation énergétique. À Madagascar, le projet de la ville nouvelle de Tana-Masoandro offre un cadre idéal pour étudier ces interactions entre climat, morphologie urbaine et performance énergétique.

1.1. Problématique spécifique à Madagascar

À Madagascar, l'urbanisation s'accélère depuis une vingtaine d'années, surtout autour d'Antananarivo. Cette croissance rapide, souvent mal encadrée, entraîne une densification du bâti et l'occupation de zones peu adaptées à l'habitat. D'après l'Instat (2023), la capitale compte aujourd'hui plus de 3,8 millions d'habitants, avec un taux d'accroissement annuel de 3,8 %, l'un des plus élevés en Afrique subsaharienne. Cette dynamique exerce une pression croissante sur les infrastructures, l'énergie et l'environnement urbain.

Le changement climatique vient aggraver la situation. Les fortes chaleurs, la perte de végétation et l'usage de matériaux peu réfléchissants (comme la tôle ou le béton) créent des microclimats urbains surchauffés, nuisant au confort thermique et augmentant les besoins en refroidissement.

Dans ce contexte, le projet de Tana-Masoandro représente une vraie opportunité. Pensée pour désengorger Antananarivo, cette ville nouvelle pourrait servir de modèle de planification durable si elle intègre dès le départ les principes de ventilation naturelle, de végétalisation et une morphologie urbaine adaptée au climat tropical.

Ainsi, la problématique de cette étude repose sur une question centrale : *comment concevoir un modèle urbain tropical durable limitant la formation d'îlots de chaleur, tout en garantissant le confort thermique et l'efficacité énergétique ?*

1.2. Revue de littérature

Depuis les travaux pionniers d'Oke (1973, 1987), la compréhension des îlots de chaleur urbains (ICU) a beaucoup évolué. On est passé d'analyses empiriques à des modèles intégrant la morphologie, les matériaux et le climat local. Des études récentes ont montré que des facteurs comme le rapport Hauteur (H) par rapport à la largeur de la chaussée (W), la densité bâtie ou la rugosité influencent directement l'ensoleillement, la ventilation et la rétention de chaleur (Ali-Toudert & Mayer, 2006 ; Giridharan et al., 2007).

Les matériaux jouent aussi un rôle crucial : le béton ou l'asphalte, avec leur faible albédo, accentuent la chaleur, tandis que les surfaces végétalisées la réduisent (Synnefa et al., 2007 ; Santamouris, 2015).

En climat tropical, l'effet ICU est souvent plus marqué, avec des températures élevées, peu de vent et un fort rayonnement. Pourtant, les stratégies d'atténuation adaptées à ces contextes, telles que la végétalisation ou la planification aérée, restent peu étudiées en Afrique. Cette recherche vise à combler ce manque en appliquant une modélisation microclimatique à un cas concret : la future ville nouvelle de Tana-Masoandro, à Madagascar.

Objectifs scientifiques de l'étude et hypothèses

Cette recherche explore comment la forme urbaine, le climat local et les matériaux influencent le confort thermique et la consommation énergétique des bâtiments à Madagascar. À travers le cas de la future ville de Tana-Masoandro, l'étude cherche à mesurer l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (ICU) et à identifier les leviers d'atténuation possibles.

Les principaux objectifs sont :

- Comprendre l'impact de paramètres urbains comme la densité, la hauteur des bâtiments, leur orientation ou les matériaux utilisés sur la formation des ICU ;
- Concevoir un modèle numérique capable de simuler les effets combinés du soleil, de la conduction thermique et de la ventilation naturelle sur le comportement thermique des bâtiments ;
- Évaluer les conséquences énergétiques de ces microclimats, notamment en ce qui concerne les besoins en refroidissement ;
- Formuler des recommandations pour un aménagement urbain adapté au climat tropical, combinant efficacité énergétique et résilience.

L'hypothèse centrale repose sur l'idée qu'un urbanisme bien pensé avec des formes ouvertes, une bonne orientation et des couloirs de ventilation, peut réduire l'intensité des ICU et améliorer les conditions de vie en milieu tropical.

II. Matériels et Méthodes

2.1. Description du site d'étude

Le site retenu pour la ville nouvelle de Tana-Masoandro se situe à 26 km au sud d'Antananarivo, capitale de Madagascar. Ce projet d'aménagement s'étend sur environ 982 hectares et prévoit d'accueillir près de 300 000 habitants. La zone, située à 1 250 mètres d'altitude, bénéficie d'un climat tropical d'altitude, avec une température moyenne annuelle autour de 22 °C. L'organisation urbaine repose sur de grands axes longitudinaux "Avenue principale" conçus pour faciliter la ventilation naturelle, complétés par un maillage de quartiers résidentiels (notre zone d'étude), commerciaux et administratifs à densité modérée.

La figure n°1 illustre la localisation de cette nouvelle ville par rapport à Antananarivo :

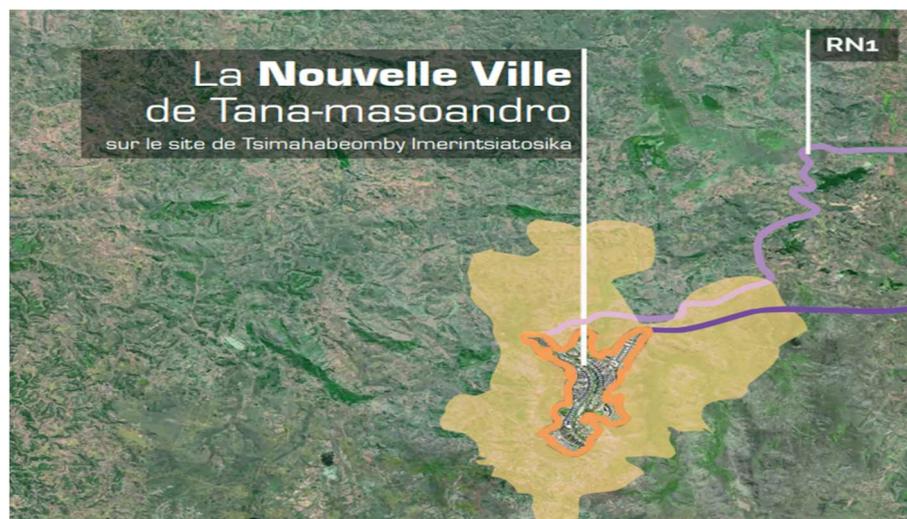


Figure 1 : Emplacement de la nouvelle ville de Tana-Masoandro

2.2. Données utilisées

Les données utilisées dans cette étude se répartissent en trois grandes catégories, à savoir climatiques, urbaines et matérielles.

Données météorologiques : elles proviennent à la fois de stations locales et d'un modèle de simulation numérique. Les paramètres pris en compte sont la température de l'air, la vitesse du vent, l'humidité relative et le rayonnement solaire. La vitesse moyenne du vent est estimée à 4 m/s, avec des variations journalières allant de 0,8 à 4,5 m/s ;

Données morphologiques : extraites d'un modèle 3D au format STL et de relevés architecturaux. En moyenne, les bâtiments mesurent 42,9 m de haut, tandis que la largeur des voies principales est d'environ 70 m. Cela donne un rapport H/W de 0,61, typique d'un tissu urbain semi-ouvert, favorisant l'équilibre entre ombrage et circulation d'air ;

Données des matériaux : les caractéristiques thermiques des matériaux utilisés dans l'aménagement (béton, bois, mur isolé) ont été intégrées à travers plusieurs paramètres, notamment la conductivité thermique (λ), la densité (ρ), la capacité thermique massique (c), la réflectance solaire (α_s) et l'albédo.

2.3. Méthodologie de modélisation thermique urbaine basée sur le modèle empirique d'Oke

2.3.1. Modèle empirique et des équations utilisés

Les équations utilisées dans cette étude sont issues des travaux empiriques de référence d'Oke (1973, 1987), qui ont permis de mettre en évidence des liens mathématiques entre l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (ICU) et des variables telles que la population, la morphologie du tissu urbain ou encore les conditions climatiques. Pour les besoins de cette recherche, ces équations ont été adaptées afin de mieux correspondre aux caractéristiques tropicales et morphologiques spécifiques de la ville nouvelle de Tana-Masoandro. Les relations mobilisées sont les suivantes :

- Relation population-température : $\Delta T_{(u-r)(max)} = 2.96 \log(P) - 6.41$ (formule 2.1)

- Formule révisée : $\Delta T_{(u-r)(max)} = 2.016 \log(P) - 4.06$ (formule 2.2)

- Relation population-vent : $\Delta T_{(max)} = P^{0.25} / (4V)^{0.5}$ (formule 2.3)

- Corrélation morphologique : $\Delta T_{(max)} = 7.54 + 3.97 \ln(H/W)$ (formule 2.4)

L'application comparative de ces équations dans le cadre de cette étude permet de simuler différents scénarios d'intensité thermique selon les configurations urbaines envisagées. Ces modèles empiriques offrent un cadre d'interprétation robuste pour relier les paramètres d'entrée à la dynamique microclimatique du site de Tana-Masoandro.

2.3.2. Présentation des jeux de données et paramètres d'entrée

La modélisation thermique repose sur l'intégration de données physiques, climatiques et morphologiques issues du site d'étude et des simulations numériques. Le tableau 1 regroupe les principaux paramètres utilisés comme variables d'entrée dans le modèle

Tableau 1 : Paramètres physiques, morphologiques et climatiques utilisés pour la modélisation thermique de la ville nouvelle de Tana-Masoandro

Paramètre	Symbole	Valeur moyenne	Unité
Hauteur moyenne des bâtiments	H	42,9	M
Largeur moyenne des voies	W	70	M
Rapport morphologique	H/W	0,61	-
Vitesse moyenne du vent	V	4	m/s
Population urbaine	P	300 000	Habitants
Température moyenne diurne	T	28	°C
Conductivité thermique	Λ	1,3	W/m·K
Densité volumique	P	2200	kg/m ³
Capacité thermique massique	C	1000	J/kg·K
Albédo de surface	As	0,25	-

Ces paramètres constituent la base de la modélisation thermique et serviront à la validation des résultats présentés dans la section suivante. Afin de vérifier la cohérence du modèle numérique et d'évaluer la pertinence des variables physiques intégrées (conductivité, albédo, facteur d'ombre, orientation des façades, etc.), une visualisation thermique tridimensionnelle a été générée pour la ville nouvelle de Tana-Masoandro.

2.4. Méthodologie de la simulation des Ilots de chaleur urbains

La méthodologie adoptée pour l'étude des ilots de chaleur urbains dans le cadre de la nouvelle ville de Tana-Masoandro repose sur une modélisation numérique intégrée. L'approche est structurée en plusieurs modèles complémentaires détaillées ci-après.

Modèle de position de soleil (formule conversion en vecteur directionnel)

$$\vec{v}_{\text{soleil}} = \begin{pmatrix} \sin(\alpha_{az}) & \cos(\alpha_{el}) \\ \cos(\alpha_{az}) & \cos(\alpha_{el}) \\ & \sin(\alpha_{el}) \end{pmatrix} \quad (\text{formule 2.5})$$

$$\text{Modèle d'ombrage géométrique : } F_{\text{ombrage}} = \frac{\text{Nombre de rayons ombrés}}{\text{Nombre total de rayons}} \quad (\text{formule 2.6})$$

Modèle de température de surface et de gains solaires :

$$\text{Élévation de température de surface : } \Delta T_{\text{soltaire}} = \frac{\alpha_S \times I_{\text{poa}}}{c_{\text{surface}}} \quad (\text{formule 2.7})$$

Température extérieure effective :

$$T_{\text{ext_eff}} = T_{\text{ref}} + \max_temp_increase \cdot (1 - \text{Facteur_ombre}) + \Delta T_{\text{soltaire}} \quad (\text{Formule 2.8})$$

Modèle de transfert de chaleur (Conduction et Convection) :

$$\text{Coefficient de convection (} h_{\text{conv}} \text{) : } h_{\text{conv}} = h_0 + a_{\text{coeff}} \times v \quad (\text{formule 2.9})$$

$$\text{Coefficient de transmission thermique (} U \text{) : } U_{\text{heure}} = \frac{1}{R_{\text{isolation}} + \frac{1}{h_{\text{con}}}} \quad (\text{formule 2.10})$$

$$\text{Déphasage thermique : } T_{\text{int_eff}} = T_{\text{cible}} + (T_{\text{ext_eff}} - T_{\text{cible}}) \times \left(1 - \frac{\text{Déphasage}}{24}\right) \quad (\text{formule 2.11})$$

$$\text{Flux de chaleur par conduction : } \dot{Q}_{\text{conduction}} = U_{\text{heure}} \times A_{\text{exposée}} \times \max(0, T_{\text{ext_eff}} - T_{\text{int_eff}}) \quad (\text{f2.12})$$

Modèle de ventilation thermique :

$$\text{Débit de renouvellement d'air (ACH) : } ACH_h = ACH_{\text{base}} + a_{\text{vent}} \times v_h \quad (\text{formule 2.13})$$

$$\text{Flux de chaleur par ventilation : } Q_{\text{vent,h}} = \dot{m}_h \times c_{\text{air}} \times (T_{\text{ext,h}} - T_{\text{int_eff}}) \quad (\text{formule 2.13})$$

Modèle de profil de vent et d'énergie :

$$\text{Profil de vent horaire : } v(h) = v_{\text{min}} + (v_{\text{max}} - v_{\text{min}}) \times \max\left\{0, \cos\left(\frac{\pi(h-h_{\text{pic}})}{12}\right)\right\} \quad (\text{formule 2.14})$$

Énergie journalière de refroidissement (conduction + ventilation) :

$$E_{\text{cool}} = E_{\text{cond}} + E_{\text{vent}} = \sum_{h=8}^{18} Q_{\text{cond,h}} \times \Delta t + \sum_{h=8}^{18} Q_{\text{vent,h}} \times \Delta t \quad (\text{formule 2.15})$$

Toutes ces formules ont été directement codées en Python pour simuler de manière réaliste les échanges thermiques liés à l'ensoleillement, à la ventilation et aux matériaux dans le contexte urbain étudié.

2.4.1. Algorithme

a. Paramètre de la simulation

La simulation vise à estimer la charge thermique journalière de chaque bâtiment à travers un modèle simplifié de transfert de chaleur (conduction, ventilation, rayonnement).

Les paramètres utilisés dans le modèle sont calibrés pour un climat tropical humide, basé sur les conditions de la nouvelle Ville de Tana Masoandro. Le tableau n°2 résume les constantes physiques et géographiques utilisées :

Tableau 2 : les constantes physiques et géographiques

Paramètre	Valeur	Unité	Description
Période de simulation	08h – 18h	Heures	Plage horaire d'ensoleillement considérée
Fuseau horaire	Indian/Antananarivo	—	Fuseau de la localisation
Latitude	-18.990710	Degrés	Latitude géographique du site
Longitude	47.320196	Degrés	Longitude géographique du site
ρ_{air}	1.2	Kg/m ³	Masse volumique de l'air
C_{air}	1005	J/(kg·K)	Capacité thermique massique de l'air
T_{cible}	22	°C	Température intérieure visée
T_{ref}	25.0	°C	Température extérieure de référence
ΔT_{max}	6	°C	Augmentation max. de température sur surface non ombragée

b. Propriétés thermiques des matériaux

Trois types de matériaux sont considérés dans la modélisation : bois, béton, et mur isolé. Le tableau n°3 résume les propriétés physiques associées à chacun de ces matériaux :

Tableau 3 : Résumé des propriétés physiques associées à chacun de ces matériaux

Paramètre	Bois	Béton	Mur Isolé	Unité	Description
ρ (Masse volumique)	400	2400	30	kg/m ³	Masse volumique du matériau
C (capacité thermique)	1700	880	1000	J/(kg·K)	Capacité thermique massique
$R_{isolation}$	3.0	0.5	5.0	m ² ·K/W	Résistance thermique de l'enveloppe
Déphasage thermique	0.2	0.05	0.4	Fraction de journée	Capacité à retarder la transmission de la chaleur
α_s (absorption solaire)	0.6	0.65	0.5	Sans unité	Coefficient d'absorption solaire des surfaces extérieures

2.4.2. Schéma de modélisation numérique

Le modèle numérique s'appuie sur une approche combinant modélisation thermoradiative et analyse géospatiale. Il intègre l'ensemble des données collectées pour simuler la dynamique thermique à l'échelle urbaine. Le schéma n°1 « Le **logigramme** » présente les différentes étapes du processus, depuis la collecte des informations jusqu'à la production finale de la carte thermique

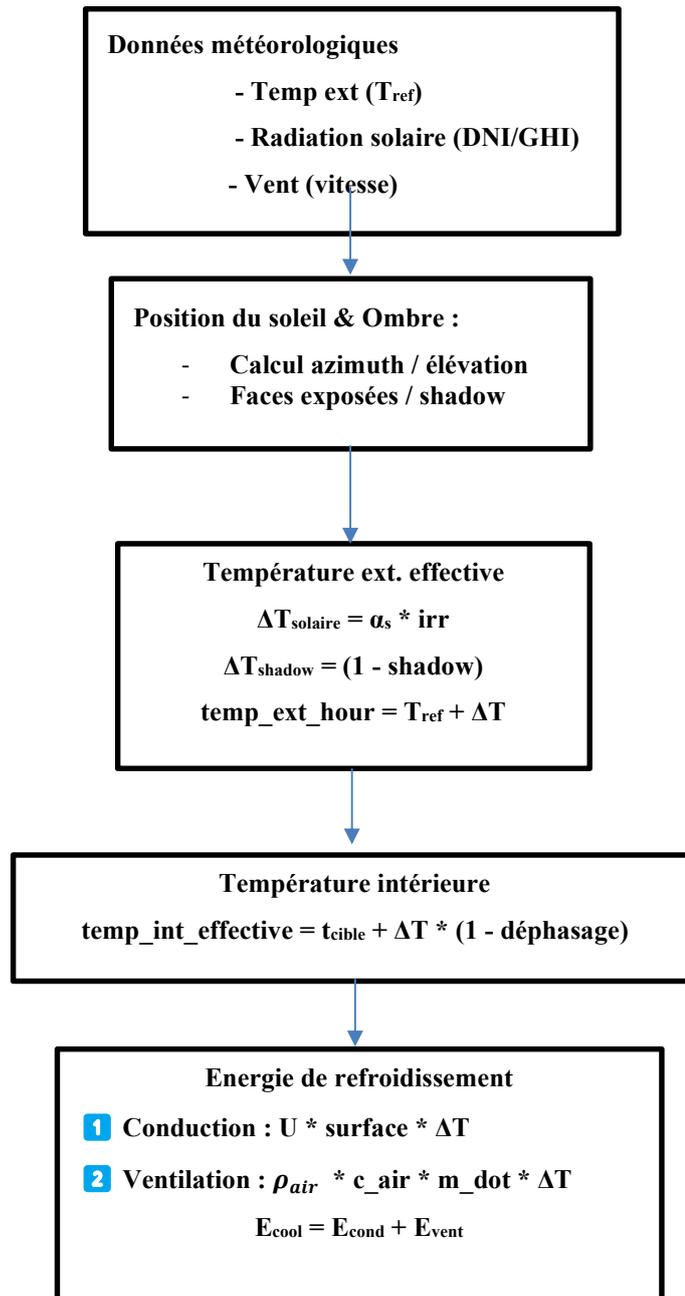


Schéma 1 : Logigramme

III. Résultats et Analyses

3.1. Estimation de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain selon les modèles empiriques d'Oke (1973–1987)

L'analyse de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (ICU) repose sur des modèles empiriques proposés par Oke (1973, 1981), qui ont largement contribué à la compréhension des relations entre les paramètres démographiques, morphologiques et microclimatiques des villes. Ces modèles établissent des corrélations mathématiques simples permettant d'estimer la différence maximale de température entre les zones urbaines et les zones rurales environnantes ($\Delta T_{u-r(max)}$).

Dans le cadre de cette étude, ces équations ont été appliquées à la ville nouvelle de Tana-Masoandro, dont la population projetée est estimée à 300 000 habitants, avec une vitesse moyenne du vent de 4 m/s, une hauteur moyenne des bâtiments de 42,9 m et une largeur moyenne de chaussée de 70 m. Ces paramètres proviennent des données de modélisation numérique et du fichier de simulation thermique urbain détaillé.

3.1.1. Modèle démographique d'Oke (1973)

La première corrélation proposée par Oke (1973) relie directement la population urbaine (P) à la différence maximale de température entre la ville et sa périphérie :

$$\Delta T_{u-r(max)} = 2.96 \log P - 6.41 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad \text{(Formule 3.1)}$$

En appliquant cette relation à Tana-Masoandro (P = 300 000 habitants) :

$$\Delta T_{u-r(max)} = 2.96 \log (300\ 000) - 6.41 = 2.96 \times 5.48 - 6.41 = 9.8 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad \text{(Formule 3.2)}$$

Cette valeur indique une intensité thermique maximale d'environ **9,8 °C**, correspondant à un scénario d'urbanisation dense et faiblement ventilée.

3.1.2. Modèle révisé d'Oke (1987)

Compte tenu de l'évolution des contextes climatiques et urbains, Oke (1987) a proposé une version ajustée de sa formule :

$$\Delta T_{u-r(max)} = 2.016 \log P - 4.06 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad \text{(Formule 3.3)}$$

L'application à Tana-Masoandro donne :

$$\Delta T_{u-r(max)} = 2.016 \log P - 4.06 = 2.016 \times 5.48 - 4.06 = 6.99 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

Cette estimation révisée suggère une intensité d'ICU modérée, autour de **7 °C**, traduisant l'effet d'une planification urbaine plus maîtrisée et d'une meilleure ventilation naturelle.

3.1.3. Modèle intégré vent–population (Oke, 1973)

Cette estimation, supérieure à celle liée uniquement à la morphologie (résultat de la formule 3.4 \approx 5,6 °C), montre que la ventilation naturelle est un facteur déterminant dans la régulation du microclimat urbain. Une circulation d'air soutenue limite le piégeage thermique, confirmant l'importance d'une planification urbaine favorisant les couloirs de vent pour réduire l'effet d'îlot de chaleur à Tana-Masoandro. Dans cette logique, Oke (1973) propose une relation intégrant explicitement la vitesse du vent (V), paramètre essentiel pour la dissipation de la chaleur accumulée en milieu urbain. L'équation suivante permet d'estimer l'intensité maximale de l'ICU en fonction de la population et du vent :

$$\Delta T_{max} = \frac{P^{0.25}}{(4V)^{0.5}} K \quad \text{(Formule 3.3)}$$

Pour une population P = 300 000 habitants et une vitesse moyenne du vent V = 4 m/s

$$\Delta T_{max} = \frac{P^{0.25}}{(4V)^{0.5}} = \frac{300\,000^{0.25}}{(4 \times 4)^{0.5}} = \frac{23.4}{2} = 11.7\,K$$

Cette intensité thermique, sensiblement plus élevée que celle obtenue par les modèles démographiques ou morphologiques, traduit une amplification thermique significative, typique des contextes tropicaux où la convection est souvent limitée. Ce résultat souligne une fois de plus la nécessité de stratégies urbaines intégrant la ventilation naturelle comme levier de régulation thermique à l'échelle de la ville.

3.1.4. Modèle morphologique d'Oke (1981)

Enfin, la relation morphologique reliant la géométrie urbaine (rapport hauteur/largeur, H/W) à l'intensité thermique permet d'intégrer la dimension architecturale :

$$\Delta T_{max} = 7.54 + 3.97 \ln\left(\frac{H}{W}\right) \quad (\text{Formule 3.4})$$

Avec H = 42,9 m et W = 70 m :

$$\Delta T_{max} = 7.54 + 3.97 \ln(0.613) = 5.6\,^{\circ}C$$

Cette valeur de 5,6 °C correspond à un tissu urbain semi-ouvert, équilibré entre ombrage et ventilation, typique d'une planification urbaine contrôlée.

Tableau 4 : Comparaison des estimations d'intensité de l'ICU selon les modèles d'Oke.

Modèle d'Oke	Paramètres considérés	Formule appliquée	Résultat (°C)	Interprétation scientifique
Oke (1973)	P = 300 000 hab.	$\Delta T_{u-r(max)} = 2.96 \log P - 6.41$	9.8	Ville dense à faible ventilation naturelle.
Oke (1987, révisé)	P = 300 000 hab.	$\Delta T_{u-r(max)} = 2.016 \log P - 4.06$	7.0	Effet modéré avec planification urbaine intégrée.
Oke (1973, vent inclus)	P = 300 000 hab., V = 4 m/s	$\Delta T_{max} = P^{0.25} / (4V)^{0.5}$	11.7	Influence du vent sur la dispersion thermique.
Oke (1981, morphologique)	H = 42,9 m ; W = 70 m	$\Delta T_{max} = 7.54 + 3.97 \ln(H/W)$	5.6	Configuration urbaine semi-ouverte avec ventilation naturelle.

3.1.5. Discussion scientifique

Les résultats obtenus indiquent que l'intensité théorique de l'îlot de chaleur urbain (ICU) à Tana-Masoandro varie entre 5,6 °C et 11,7 °C, selon le modèle empirique appliqué. Cette plage de valeurs illustre bien la sensibilité du phénomène aux paramètres urbains, en particulier la densité bâtie, la géométrie du tissu urbain et les conditions climatiques locales.

Un facteur structurant est le rapport morphologique H/W, estimé à 0,61 (pour une hauteur moyenne des bâtiments de 42,9 m et une largeur de rue de 70 m). Ce ratio caractérise une morphologie semi-ouverte, favorable à un compromis entre ombrage des surfaces et ventilation naturelle. D'après Ali-Toudert et Mayer (2006), cette configuration (H/W entre 0,5 et 0,7) est optimale pour limiter l'échauffement excessif tout en maintenant un bon niveau de confort thermique en climat tropical.

L'application du modèle morphologique d'Oke (1981) à ce contexte donne une intensité thermique modérée de 5,6 °C, traduisant l'effet bénéfique d'une planification urbaine aérée. En revanche, le modèle combinant densité de population et faible ventilation ($\Delta T_{max} = 11,7\,^{\circ}C$) suggère qu'en absence de stratégie de ventilation naturelle, l'effet d'ICU peut être nettement amplifié.

Ces résultats s'inscrivent dans la continuité d'expériences observées dans d'autres villes tropicales planifiées, comme Singapour (Emmanuel, 2017) ou Abidjan (Diedhiou et al., 2020), où une morphologie urbaine bien pensée et l'intégration d'espaces

végétalisés ont permis de réduire significativement l'intensité des ICU. Cela confirme l'importance de concevoir des espaces urbains structurés autour de corridors de ventilation, de surfaces réfléchissantes et de densités maîtrisées, afin de concilier développement urbain et résilience climatique

3.2. Visualisation thermique et validation du modèle numérique

3.2.1. Cartographie thermique et visualisation des ICU

La figure n°2 présente une simulation thermique horaire en 3D illustrant la variation de température des bâtiments d'Antananarivo entre 8h et 18h. Les résultats révèlent une montée progressive des températures, atteignant un pic entre 13h et 15h, avec des valeurs supérieures à 30 °C sur les structures les plus exposées.

Les bâtiments présentant une morphologie compacte, une faible hauteur ou bénéficiant d'ombrage conservent des températures modérées (~28 °C), soulignant l'effet protecteur de la forme urbaine et de la ventilation naturelle. À l'inverse, les bâtiments isolés ou orientés plein nord présentent des surchauffes localisées.

Ce modèle met en évidence l'importance de la morphologie urbaine, de l'orientation et des caractéristiques thermiques dans la gestion du confort microclimatique, et justifie l'intégration de stratégies de ventilation et de matériaux réfléchissants dans la planification urbaine.

Animation température horaire (8h-18h) — Antananarivo

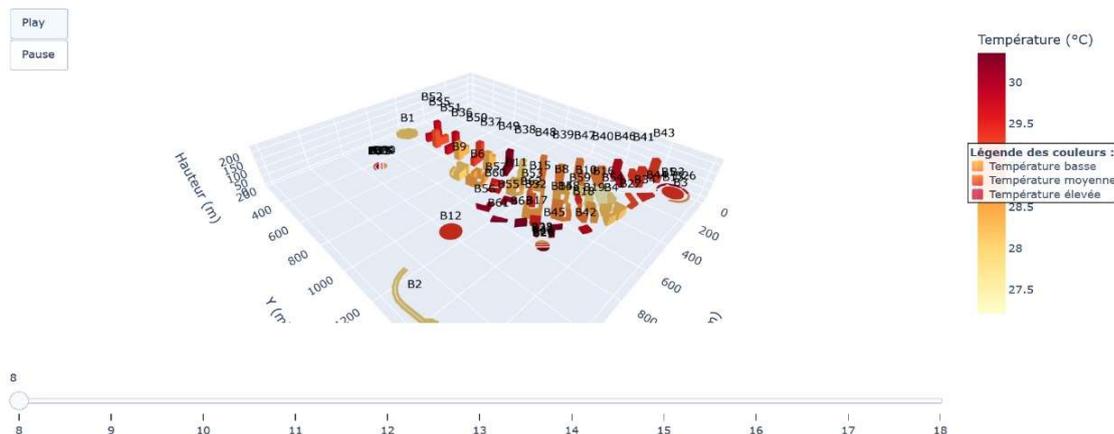


Figure 2: Carte thermique tridimensionnelle simulée de la ville nouvelle de Tana-Masoandro

Source : Simulation numérique réalisée sous Python (modèle ICU, 2025).

3.2.2. Résultats énergétiques par typologie de matériaux

L'analyse énergétique journalière montre que le béton est le matériau le plus énergivore, avec une charge de refroidissement moyenne de 5.4 kWh/jour, contre 3.1 kWh/jour pour le bois et 1.9 kWh/jour pour le mur isolé. Ces valeurs traduisent les différences de résistance thermique (R) et de capacité d'absorption solaire (α) entre les matériaux. Le mur isolé, avec un R de 5.0 m²K/W et $\alpha = 0.5$, limite fortement les gains thermiques, confirmant l'importance du choix des enveloppes dans la conception climatique.

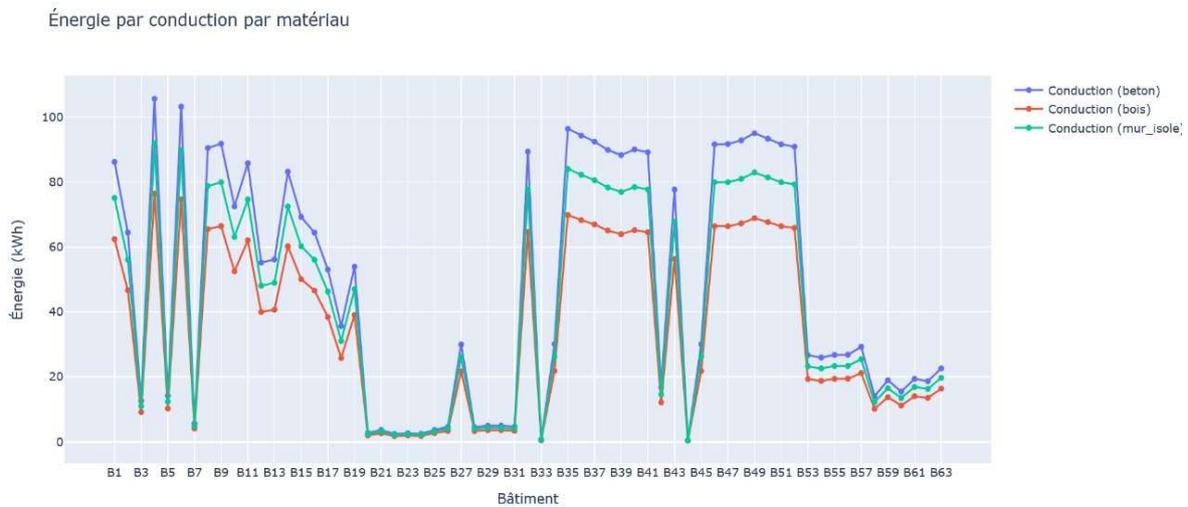


Figure 3 : Energie par condition par matériaux

3.2.3. Énergie de refroidissement totale par matériau

L'analyse de l'énergie de refroidissement totale montre que les bâtiments avec murs isolés consomment paradoxalement plus d'énergie (jusqu'à 2600 kWh) que ceux en bois ou en béton. Les bâtiments en béton présentent les consommations les plus faibles, suivis du bois. Cette inversion s'explique probablement par une accumulation de chaleur interne due à l'inertie thermique élevée des murs isolés, qui retiennent la chaleur en période chaude si la ventilation ou la conception n'est pas optimisée. Cela souligne que l'efficacité de l'isolation dépend du climat local et de la stratégie thermique globale du bâtiment.



Figure 4 : Énergie de refroidissement totale par matériau

3.2.4. Énergie par ventilation par matériau

L'analyse de l'énergie liée à la ventilation montre que les bâtiments avec murs isolés consomment nettement plus d'énergie que ceux en bois ou en béton. Cette tendance s'explique par une réduction des échanges thermiques naturels dans les structures fortement isolées, nécessitant une ventilation mécanique accrue pour maintenir un confort thermique intérieur. À l'inverse, le béton, bien que moins isolant, permet une meilleure dissipation passive de la chaleur, réduisant ainsi les besoins en ventilation.

Cela souligne l'importance d'adapter les stratégies de ventilation au niveau d'isolation thermique pour éviter une surconsommation énergétique.

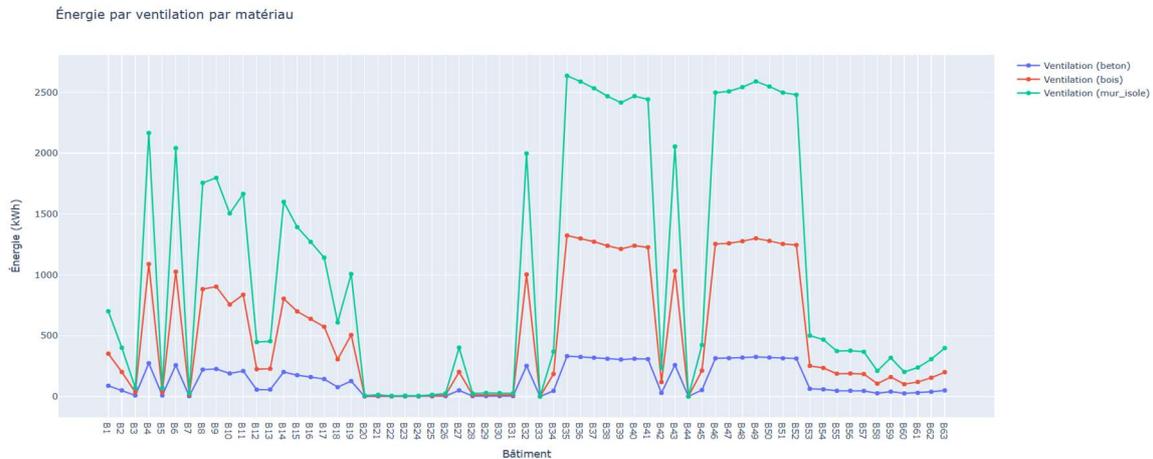


Figure 5 : Énergie par ventilation par matériau

3.2.5. Comparatif Température par matériau

Les températures moyennes, minimales et maximales sont quasiment identiques pour le béton et le bois, avec des variations proches de 27,5 à 29,5 °C. En revanche, les bâtiments en mur isolé maintiennent une température stable autour de 25 °C, sans fluctuations horaires visibles. Ce résultat souligne l'efficacité thermique des murs isolés pour limiter les pics de chaleur et maintenir une stabilité thermique intérieure, essentielle pour le confort et la performance énergétique.

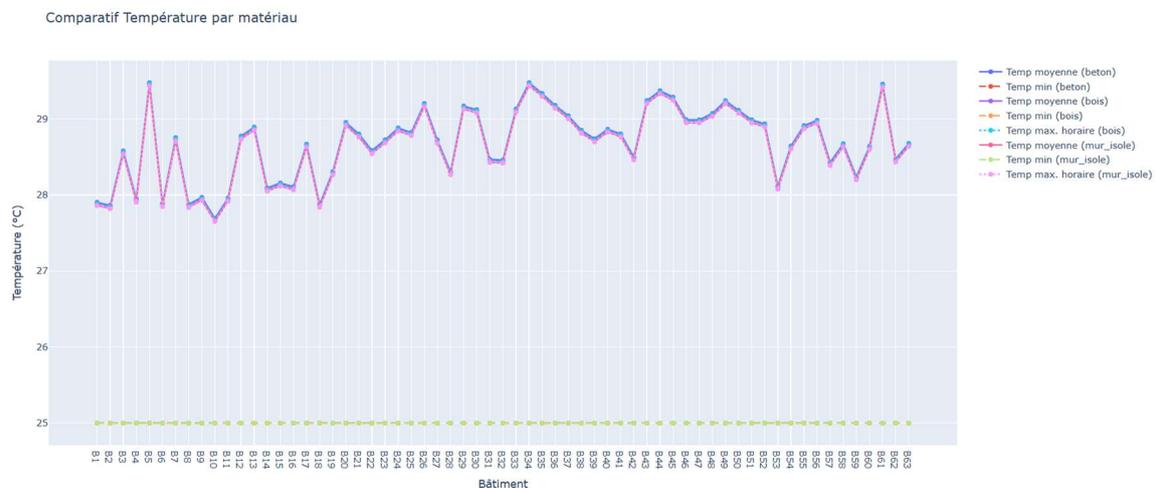


Figure 6 : Comparatif Température par matériau

3.2.6. Bilan énergétique de refroidissement par bâtiment

Ce graphique n°7 représente la charge thermique de refroidissement quotidienne par bâtiment, en distinguant les deux principaux modes de transfert de chaleur : la conduction et la ventilation. L'analyse tient compte des types de matériaux utilisés et des conditions climatiques simulées. Il en ressort que la ventilation constitue le principal facteur influençant la demande énergétique,

reflétant l'importance des paramètres climatiques et morphologiques. À l'inverse, la conduction thermique est davantage liée aux propriétés des matériaux et au niveau d'isolation des bâtiments.

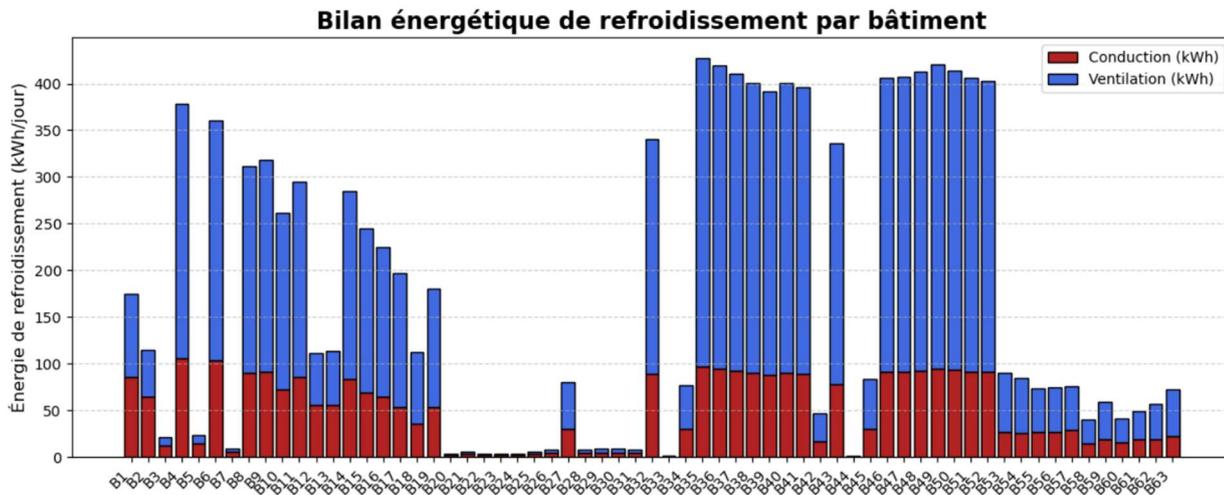


Figure 7 : Bilan énergétique global

3.2.7. Influence des paramètres climatiques (vent, ombrage, orientation)

L'effet du vent est simulé par un profil sinusoïdal horaire atteignant un pic à 13h, ce qui influence directement le coefficient de convection. L'ombrage modifie fortement les températures de surface : un facteur d'ombrage de 1 (ombrage complet) réduit l'élévation thermique de 5.9°C à 1.2°C. Les façades orientées plein ouest subissent les plus fortes hausses, renforçant l'idée d'une optimisation morphologique orientée vers la réduction des apports solaires.

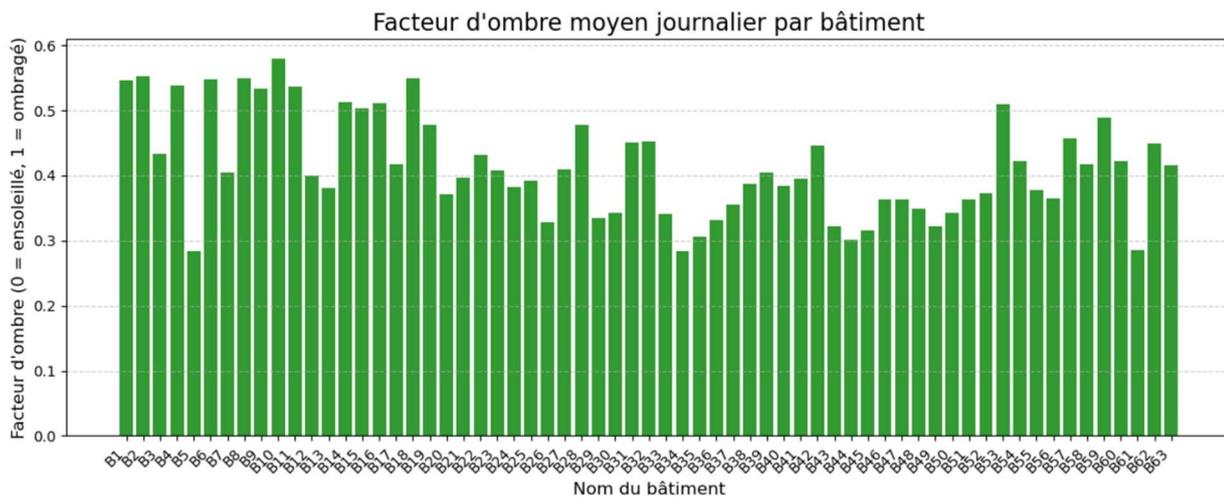


Figure 8 : facteur d'ombre moyen journalier par bâtiment

Ce graphique représente le niveau moyen d'ensoleillement ou d'ombrage auquel chaque bâtiment est exposé au cours d'une journée type. Le facteur d'ombre varie de 0 (surface totalement ensoleillée) à 1 (surface entièrement ombragée).

- La majorité des bâtiments présentent un facteur d'ombre compris entre 0.35 et 0.55, ce qui indique un ombrage partiel régulier lié à la densité du tissu urbain ;

- Certains bâtiments se distinguent avec des valeurs plus faibles (< 0.3), traduisant une exposition solaire directe et donc une plus forte élévation thermique ;
- D'autres atteignent des valeurs proches de 0.6, confirmant un ombrage important grâce à la proximité de volumes bâtis voisins ;
- Ces différences soulignent le rôle déterminant de la morphologie urbaine (hauteurs relatives, orientation des rues, compacité) dans la réduction ou l'accentuation des apports solaires.

En résumé, le facteur d'ombre agit comme un régulateur thermique naturel, limitant la formation des îlots de chaleur urbains dans les zones les plus denses, mais accentuant les contrastes entre bâtiments selon leur position et orientation.

3.2.8. Comparaison interscénariale (béton vs bois vs mur isolé)

Une simulation comparative entre trois typologies de bâtiments (même gabarit, matériaux différents) révèle que l'usage du mur isolé permet une réduction de 64% de la charge énergétique par rapport au béton. Le bois, bien qu'intermédiaire, présente un meilleur comportement thermique que le béton, grâce à sa faible densité et sa capacité thermique élevée. Cette hiérarchisation des matériaux permet de définir des recommandations constructives adaptées aux conditions tropicales d'Antananarivo.

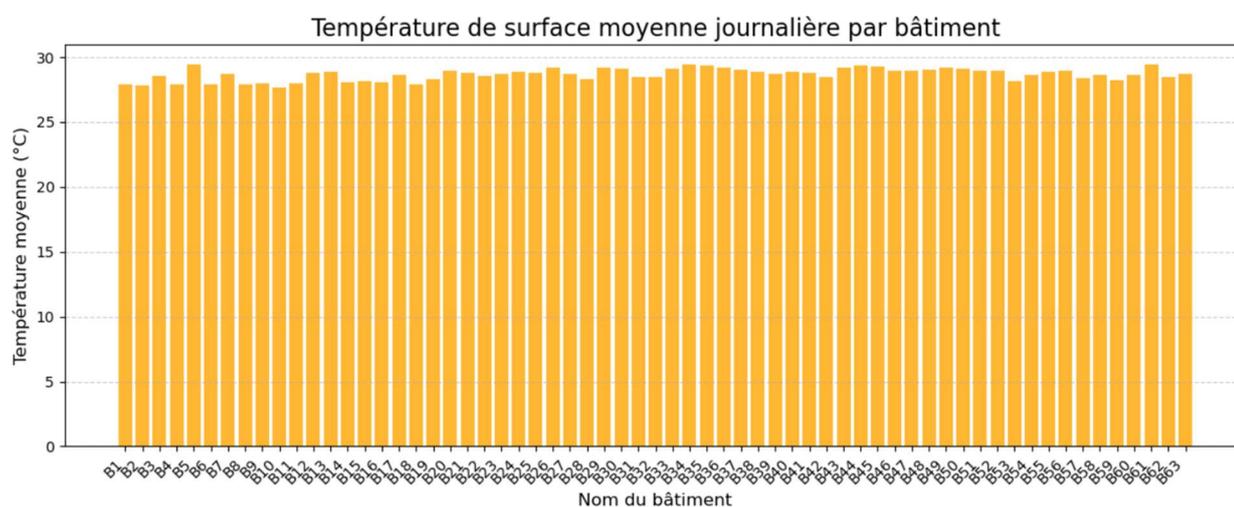


Figure 9 : Température moyenne par bâtiments

Cette figure n°9 présente la température de surface moyenne journalière des différents bâtiments simulés. Les valeurs oscillent globalement entre 27°C et 30°C, avec de faibles écarts selon la morphologie et les conditions locales d'ombrage et de ventilation.

Analyse des résultats :

Homogénéité générale : La majorité des bâtiments montrent une température moyenne élevée et relativement uniforme, traduisant l'importance du rayonnement solaire global dans le climat tropical étudié.

Variations spécifiques : Certains bâtiments affichent des températures légèrement plus basses ($\approx 27^\circ\text{C}$), généralement liés à un facteur d'ombre plus important (Voir figure 8) ou à l'utilisation de matériaux avec une inertie thermique plus élevée (voir figure 9).

Températures maximales : Les bâtiments atteignant des valeurs proches de 30°C correspondent aux typologies fortement exposées au rayonnement direct, avec des façades orientées ouest/sud-ouest et une faible protection ombragée.

Lien avec les matériaux : Le béton, par sa forte densité et sa conductivité thermique, tend à accumuler davantage la chaleur, ce qui se traduit par des températures moyennes de surface plus élevées par rapport aux bâtiments en bois ou à isolation renforcée.

Enjeux microclimatiques : Ces résultats confirment que la morphologie urbaine et le choix des matériaux ont un effet direct sur la température de surface, contribuant à la formation des îlots de chaleur. Les écarts de quelques degrés, bien que faibles en apparence, se traduisent par des différences significatives en termes de confort thermique et de besoins énergétiques.

En résumé, cette figure démontre que la température moyenne des bâtiments à Tana-Masoandro reste élevée sur l'ensemble du parc simulé, mais que des variations ponctuelles, liées à l'ombrage et aux propriétés thermiques des matériaux, jouent un rôle déterminant dans la réduction ou l'amplification du phénomène d'îlot de chaleur urbain.

3.2.9. Synthèse des résultats

L'étude révèle que la **morphologie urbaine** (compacité, ombrage, orientation) et les **matériaux de construction** influencent fortement le confort thermique et les besoins énergétiques à Tana-Masoandro.

- Les **murs isolés** assurent une meilleure stabilité thermique ($\approx 25\text{ °C}$) mais peuvent générer une surconsommation en refroidissement si la ventilation est mal conçue.
- Le **béton** présente la plus faible consommation énergétique globale, en raison d'une dissipation thermique facilitée par une ventilation naturelle.
- Le **bois** offre un compromis intéressant entre inertie thermique et performance énergétique.
- La **ventilation** constitue le principal levier énergétique, surpassant la conduction.
- Le **facteur d'ombrage** réduit efficacement les gains thermiques, avec des écarts allant jusqu'à 5 °C entre zones exposées et ombragées.

Conclusion : L'intégration de matériaux adaptés, d'une ventilation efficace et d'une morphologie urbaine optimisée est essentielle pour limiter les îlots de chaleur et améliorer la performance énergétique en climat tropical.

3.3. Synthèse comparative et validation des résultats

L'analyse croisée des simulations thermiques et des modèles empiriques d'Oke permet de valider la cohérence des résultats obtenus et de confirmer les leviers urbains influençant l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (ICU) à Tana-Masoandro.

3.3.1. Intensité thermique urbaine validée par les modèles d'Oke

Les différentes formules d'Oke appliquées à Tana-Masoandro estiment une intensité maximale de l'ICU comprise entre $5,6\text{ °C}$ et $11,7\text{ °C}$, selon les paramètres pris en compte (morphologie, densité, vent).

- Le modèle morphologique ($\Delta T \approx 5,6\text{ °C}$) reflète l'effet bénéfique d'une configuration semi-ouverte favorisant la ventilation ;
- À l'inverse, le modèle intégrant faible ventilation ($\Delta T \approx 11,7\text{ °C}$) souligne les risques de surchauffe en contexte tropical dense, sans stratégies d'aération.

Ces résultats sont en accord avec la cartographie thermique 3D simulée, qui met en évidence des surchauffes localisées ($>30\text{ °C}$) dans les bâtiments les plus exposés, tandis que ceux bénéficiant d'ombrage et d'une morphologie compacte conservent des températures modérées ($\sim 28\text{ °C}$).

3.3.2. Comparaison des matériaux : performance thermique et énergétique

Les matériaux analysés présentent des comportements distincts :

- Mur isolé : meilleures températures intérieures ($\sim 25\text{ °C}$), mais risques de surchauffe interne et consommation accrue si la ventilation est insuffisante ;
- Béton : faible consommation globale grâce à une dissipation thermique passive, mais températures de surface plus élevées ;

- Bois : compromis thermique intéressant, combinant inertie modérée et réduction des charges de refroidissement.

3.3.3. Ventilation et ombrage comme facteurs clés

La ventilation est identifiée comme le principal levier de réduction énergétique, dépassant les effets de la conduction. L'ombrage, mesuré par un facteur moyen entre 0,35 et 0,55, permet de réduire les températures de surface jusqu'à 5 °C, confirmant son rôle de régulateur thermique passif.

3.3.4. Validation interscénariale

Une simulation comparative entre typologies confirme que l'usage de murs isolés permet de réduire jusqu'à 64 % des charges énergétiques par rapport au béton, à condition d'être associé à une ventilation adaptée.

Conclusion

L'ensemble des résultats confirme la cohérence du modèle numérique avec les modèles empiriques, et démontre que la morphologie urbaine, la ventilation naturelle, l'ombrage et le choix des matériaux sont des leviers essentiels pour limiter les ICU et optimiser le confort thermique en climat tropical. Une approche intégrée est donc indispensable pour une planification urbaine durable et résiliente.

IV. Discussion scientifique

4.1. Interprétation des résultats au regard des études antérieures

Les résultats obtenus dans cette étude corroborent plusieurs travaux antérieurs portant sur les dynamiques microclimatiques en milieu urbain tropical. L'estimation de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (ICU), comprise entre **5,6 °C et 11,7 °C** selon les modèles d'Oke (1973, 1981, 1987), est cohérente avec les observations faites dans des contextes similaires, tels que ceux rapportés à Singapour (Emmanuel, 2017) ou à Abidjan (Diedhiou et al., 2020), où des morphologies urbaines denses et peu ventilées ont entraîné des intensités thermiques supérieures à 10 °C. La cartographie thermique simulée pour Tana-Masoandro montre, de manière concordante, une montée progressive des températures, culminant à plus de **30 °C** dans les bâtiments les plus exposés, renforçant la pertinence des modèles empiriques mobilisés.

Par ailleurs, les performances énergétiques des différents matériaux étudiés s'alignent avec les travaux de Santamouris (2014), qui souligne que les murs isolés, bien que très efficaces en termes de régulation thermique, peuvent engendrer des surcharges internes si la ventilation est mal adaptée. Cette complexité est bien illustrée ici, où les murs isolés maintiennent une température intérieure stable (~25 °C), mais avec une consommation énergétique accrue en refroidissement (jusqu'à 2600 kWh).

4.2. Influence des choix morphologiques et des paramètres climatiques

Les choix morphologiques influencent directement la formation des ICU. Le rapport hauteur/largeur ($H/W = 0,61$), représentatif d'une morphologie semi-ouverte, permet un compromis optimal entre ombrage et ventilation, conformément aux recommandations de Ali-Toudert et Mayer (2006). Cette configuration favorise une réduction modérée de la température ($\Delta T \approx 5,6$ °C) tout en maintenant un confort thermique acceptable. À l'inverse, les bâtiments orientés plein ouest, faiblement ombragés, ou disposant d'une forte exposition solaire présentent des températures maximales nettement plus élevées, pouvant atteindre 30 °C.

Le profil horaire du vent, avec un pic à 13h, influence également les échanges thermiques convectifs. Les modèles intégrant ce paramètre (ex. Oke, 1973 avec vent) prédisent une intensité thermique maximale plus élevée ($\approx 11,7$ °C), soulignant que, même dans une ville planifiée, l'absence de corridors de ventilation ou une mauvaise orientation du tissu urbain peut accentuer l'effet d'ICU. Le facteur d'ombre, variant de 0,3 à 0,6 selon les bâtiments, agit comme un régulateur thermique naturel, réduisant localement les températures de surface de près de 5 °C.

4.3. Corrélation entre forme urbaine, confort thermique et performance énergétique

Les résultats confirment une corrélation forte entre la forme urbaine, la performance énergétique et le confort thermique. Les bâtiments compacts et bien ombragés affichent une température intérieure plus stable et une consommation de refroidissement réduite. La ventilation, quant à elle, est identifiée comme le principal levier énergétique, surpassant la conduction dans la majorité des cas. Elle joue un rôle déterminant dans la dissipation de la chaleur accumulée, notamment pour les matériaux à forte inertie comme le béton ou les murs isolés.

Le modèle numérique Python utilisé dans cette étude a permis de relier directement la morphologie urbaine aux besoins énergétiques simulés. Les zones présentant les plus fortes températures de surface (≥ 32 °C) correspondent aux quartiers à fort albédo négatif (béton, bitume) et à faible perméabilité thermique, confirmant la relation entre configuration spatiale et consommation énergétique accrue.

Ainsi, la conception urbaine de Tana-Masoandro, intégrant des volumes ouverts, des espaces verts interstitiels et des axes de ventilation naturelle, constitue une stratégie climatique adaptée pour limiter les besoins de refroidissement et améliorer le confort thermique. Ces résultats rejoignent les recommandations bioclimatiques formulées par Santamouris (2014) et Emmanuel (2017), qui appellent à repenser l'urbanisme tropical autour de la gestion passive des flux thermiques et du confort des usagers.

4.4. Limites du modèle et perspectives d'amélioration

Bien que le modèle de simulation reproduise fidèlement les tendances thermiques observées, certaines limites persistent. La résolution spatiale simplifiée et l'approximation des propriétés des matériaux peuvent entraîner une sous-estimation locale des écarts de température. De plus, des paramètres climatiques clés tels que l'humidité relative, la turbulence, ou l'effet de stockage thermique du sol ne sont pas encore pleinement intégrés, limitant la précision en conditions réelles. Le modèle n'inclut pas non plus les apports internes ni la variabilité des comportements d'usage.

Les perspectives d'amélioration portent sur l'intégration de **modèles CFD** pour simuler la ventilation urbaine à fine échelle, l'ajout de scénarios dynamiques (occupation, saisonnalité), et l'évaluation de solutions passives innovantes (végétalisation, matériaux à changement de phase), afin de renforcer la robustesse du modèle comme outil de planification climatique.

V. Conclusion et perspectives

5.1. Principaux apports scientifiques

Cette recherche apporte une contribution originale à l'analyse microclimatique des villes tropicales, en proposant une modélisation thermique intégrée appliquée au cas de la ville nouvelle de Tana-Masoandro. L'approche croise les modèles empiriques d'Oke et des simulations numériques tridimensionnelles sous Python, permettant d'estimer une intensité d'îlot de chaleur urbain (ICU) variant entre 5,6 °C et 11,7 °C selon les configurations morphologiques et climatiques. Le modèle a permis d'établir des corrélations claires entre la forme urbaine, les matériaux, la ventilation et les performances énergétiques, validant l'hypothèse selon laquelle la planification morphologique est un levier clé pour atténuer les ICU en contexte tropical.

5.2. Recommandations pour la planification urbaine durable

Les résultats de l'étude conduisent à plusieurs recommandations opérationnelles pour un urbanisme tropical durable :

- Favoriser les morphologies semi-ouvertes (H/W entre 0,5 et 0,7) afin d'équilibrer l'ombrage et la ventilation naturelle ;
- Intégrer des corridors de vent et des espaces verts interstitiels pour améliorer le brassage d'air et réduire les surchauffes ;
- Éviter les matériaux à fort albédo négatif (ex. béton nu, bitume) dans les zones fortement exposées, ou les compenser par des solutions réfléchissantes ou végétalisées ;
- Adapter les stratégies de ventilation aux matériaux utilisés : les murs isolés doivent impérativement être associés à une aération efficace pour éviter l'accumulation thermique ;
- Hiérarchiser les matériaux selon leur inertie thermique, en favorisant des solutions hybrides comme le bois ou les isolants à forte résistance thermique.

Ces préconisations rejoignent les approches bioclimatiques défendues par Santamouris (2014) et Emmanuel (2017), et peuvent guider les acteurs publics dans la conception d'environnements urbains plus résilients à Madagascar et dans d'autres contextes tropicaux.

5.3. Perspectives de recherche

Plusieurs pistes peuvent prolonger cette étude :

- L'intégration de modèles CFD (Computational Fluid Dynamics) pour affiner la représentation des flux d'air et simuler des effets d'accumulation thermique à très fine échelle ;
- L'ajout de paramètres climatiques dynamiques (humidité, rayonnement diffus, effet de stockage du sol) pour améliorer la précision des simulations ;
- L'introduction de scénarios d'occupation tenant compte des usages réels des bâtiments (densité, équipements, profils horaires) ;
- Enfin, l'évaluation de solutions passives innovantes (matériaux à changement de phase, toitures végétalisées, surfaces à albédo modulable) permettrait de tester des variantes constructives plus adaptées aux contraintes du climat tropical humide.

5.4. Conclusion générale

À travers le cas de Tana-Masoandro, cette étude démontre que la forme urbaine, les matériaux et la ventilation naturelle sont des déterminants majeurs de la régulation thermique en milieu urbain tropical. En croisant des modèles empiriques reconnus et des outils de simulation numérique, elle offre un cadre méthodologique applicable à d'autres projets urbains en contexte similaire. La maîtrise des ICU ne peut être dissociée d'une planification urbaine intégrée, articulant performance énergétique, confort thermique et résilience climatique. En ce sens, la ville de Tana-Masoandro constitue un terrain d'expérimentation pertinent pour développer un urbanisme plus durable à Madagascar et dans les pays du Sud en transition.

Références

- [1]. Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2006). Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. **Building and Environment**, 41(2), 94–108.
- [2]. Diedhiou, A., Faye, C., & Diouf, M. (2020). Urban Heat Island and Urban Planning in Tropical Context: Case of Abidjan. **International Journal of Environmental Studies**, 77(1), 85–101.
- [3]. Emmanuel, R. (2017). **Urban Microclimate and Thermal Comfort: Design for Climate Resilience**. Routledge.
- [4]. Giridharan, R., Ganesan, S., & Lau, S. S. Y. (2007). Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong. **Energy and Buildings**, 36(6), 525–534.
- [5]. Oke, T. R. (1973). City size and the urban heat island. **Atmospheric Environment**, 7(8), 769–779.
- [6]. Oke, T. R. (1981). Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. **Journal of Climatology**, 1(3), 237–254.
- [7]. Oke, T. R. (1987). **Boundary Layer Climates** (2nd ed.). Routledge.
- [8]. Santamouris, M. (2014). Cooling the cities: A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. **Solar Energy**, 103, 682–703.
- [9]. Santamouris, M. (2015). Regulating the damaged thermostat of the cities—Status, impacts and mitigation challenges. **Energy and Buildings**, 91, 43–56.
- [10]. Synnefa, A., Santamouris, M., & Akbari, H. (2007). Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. **Energy and Buildings**, 39(11), 1167–1174.